

Méthode de dimensionnement du réservoir dans les systèmes de pompage photovoltaïques

F. Carrier et E. J. Schiller

Volume 6, numéro 2, 1993

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705172ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705172ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Carrier, F. & Schiller, E. J. (1993). Méthode de dimensionnement du réservoir dans les systèmes de pompage photovoltaïques. *Revue des sciences de l'eau*, 6, (2), 175-193. <https://doi.org/10.7202/705172ar>

Résumé de l'article

L'un des plus urgents problèmes auquel ont à faire face plusieurs pays en voie de développement est l'accès à l'eau potable. La plus grande partie de la population touchée par ce problème se retrouve en milieu rural, éloignée des grands réseaux de distribution d'électricité. Pour tenter de résoudre cette crise, l'introduction de systèmes de pompage photovoltaïques (PV), dans le cadre de programmes de pré-électrification rurale, offre une solution attrayante pour satisfaire les besoins en eau, en terme d'autonomie, de fiabilité et de performance.

Un système de pompage photovoltaïque comprend un champ de modules PV qui transforme l'énergie solaire en électricité. Un onduleur (aussi appelé convertisseur) transforme ensuite le courant continu (CC) généré par le champ en courant alternatif (CA), ce dernier permettant d'alimenter un groupe moto-pompe (GMP) qui peut être immergé - dans un puits ou un forage - ou de surface (sur une rivière). Il existe aussi des GMP à courant continu. Au lieu de stocker les surplus d'énergie produite dans de dispendieux accumulateurs (batteries), ce sont les surplus d'eau pompée que l'on emmagasine dans un réservoir. Ce système, dit « au fil du soleil », a obtenu d'excellentes performances en conditions réelles d'opération. Cependant, avec les méthodes de conception actuelles, la taille du réservoir est souvent grossièrement estimée.

Dans le cas d'un réservoir trop petit, il en résulte une insatisfaction des usagers lorsque des débordements de réservoir se produisent. Ce gaspillage d'eau fait subir à la population des privations en ce qui concerne la consommation personnelle et affecte la rentabilité de l'opération quand les excédents d'eau sont habituellement vendus ou destinés à l'irrigation. Lorsque le réservoir est sur-dimensionné, les villageois ont alors à faire face à des coûts de construction trop élevés.

La démarche entreprise dans cet article a pour but d'offrir une méthode de conception du réservoir qui ne se base pas uniquement sur le jugement et/ou les expériences passées.

L'analyse du comportement des différentes composantes d'un système de pompage solaire a permis de mettre au point des modèles informatiques qui ont ensuite été validés grâce à des données obtenues sur le terrain au Sénégal. Le logiciel développé dans ce travail a pour but d'offrir une grande flexibilité pour la simulation de différents types d'équipement dans divers milieux d'opération. La qualité des résultats dépend étroitement de la précision des paramètres décrivant l'équipement et des données météorologiques.

Grâce au logiciel, on pourra prédire le fonctionnement de nouvelles installations et assurer le suivi des systèmes déjà en place. La personne qui doit concevoir le système PV, de concert avec la communauté villageoise, sera capable de déterminer la taille optimale du réservoir (et peut-être valider les résultats obtenus avec les règles empiriques) permettant ainsi de mieux évaluer les coûts et les risques de pénurie qui sont liés à l'exploitation d'un système de pompage PV.

Méthode de dimensionnement du réservoir dans les systèmes de pompage photovoltaïques

Method for sizing water tanks
in solar water pumping systems

F. CARRIER¹, E. J. SCHILLER

Reçu le 30 janvier 1992, accepté pour publication le 3 février 1993*.

SUMMARY

Access to safe water supply is one of the most urgent problems in many developing countries. Most populations affected by this problem are in rural areas, where electricity distribution networks are not yet installed. In order to alleviate this crisis, the introduction of photovoltaic (PV) pumping systems provides an attractive solution to satisfy water needs, in terms of autonomy, reliability and performance.

A solar pumping system consists of an array of PV modules that transform solar energy into electricity. An inverter converts the direct current (DC) generated by the array to alternating current (AC), that can then be used by a motor-pump unit, either submerged (in a borehole or a well) or on a river surface. DC motor-pump units can also be used. Instead of charging expensive batteries with the excess energy generated, the water is pumped and stored in a reservoir. This type of system yields excellent performances in real-time operating conditions. The size of the tank is, however, often roughly estimated in conventional design procedures.

Consequently, problems such as the heavy financial burden of an over-sized tank or, on the contrary, a waste of water resources due to spillage in the case of a too-small tank are, unfortunately, quite common. These problems lead to dissatisfaction among users when they have to deal with periods of personal water shortages and, in situations where the water is sold or used for irrigation, economic losses.

The process introduced in this paper provides a design tool for sizing the water tank that goes further than mere « guesstimates ».

1. Centre international des ressources en eau, département de génie civil, Université d'Ottawa, 61, Louis-Pasteur, Ottawa (Ontario), Canada, K1N 6N5, tél. : (613) 564-2258, fax : (613) 564-9860.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 21 décembre 1993.

Analysis of the behaviour of the different components of a solar system was incorporated into computerized models, which were then validated with data gathered during field studies carried out in Sénégal. The resulting software gives the designer flexibility to simulate different types of equipment under various operating conditions. The quality of the results depends closely on the accuracy of the parameters describing the equipment as well as on the reliability of the meteorological data.

Different models are used in the software. The hourly climatic conditions (solar radiation and temperature) are simulated using the normal distribution. The model used to find the current-voltage (I-V) characteristics of the solar array has been developed by the Jet Propulsion Laboratory. The motor and centrifugal pump are modelled with a third order equation often used in practice. Finally, the optimal tank size is found with the volumetric method proposed by Al-Layla.

From the climatic data the software enables the designer to study a typical day for a selected period of time, usually during the month with the lowest solar radiation. From the climatic data, the PV array output power for every hour of the day, the pumping flow-rate and finally the amount of water in the tank can be determined. Five scenarios of available sunshine have been calculated, allowing the designer to evaluate low-risk situations (low sunshine expected, thus larger equipment needed) and high-risk situations (higher sunshine, requiring smaller equipment).

The software permits the prediction of performance for new systems as well as the diagnosis of existing ones. The system designer, in consultation with users, can then find the optimal size of the water tank (and possibly confirm the results obtained from the rule-of-thumb estimates) and better assess, with the help of a decision-making chart, the cost of a system and the risks of water shortages.

Key-words : *developing countries water supply, storage reservoir, solar water pumping.*

RÉSUMÉ

L'un des plus urgents problèmes auquel ont à faire face plusieurs pays en voie de développement est l'accès à l'eau potable. La plus grande partie de la population touchée par ce problème se retrouve en milieu rural, éloignée des grands réseaux de distribution d'électricité. Pour tenter de résoudre cette crise, l'introduction de systèmes de pompage photovoltaïques (PV), dans le cadre de programmes de pré-électrification rurale, offre une solution attrayante pour satisfaire les besoins en eau, en terme d'autonomie, de fiabilité et de performance.

Un système de pompage photovoltaïque comprend un champ de modules PV qui transforme l'énergie solaire en électricité. Un onduleur (aussi appelé convertisseur) transforme ensuite le courant continu (CC) généré par le champ en courant alternatif (CA), ce dernier permettant d'alimenter un groupe moto-pompe (GMP) qui peut être immergé - dans un puits ou un forage - ou de surface (sur une rivière). Il existe aussi des GMP à courant continu. Au lieu de stocker les surplus d'énergie produite dans de dispendieux accumulateurs (batteries), ce sont les surplus d'eau pompée que l'on emmagasine dans un réservoir. Ce système, dit « au fil du soleil », a obtenu d'excellentes performances en conditions réelles d'opération. Cependant, avec les méthodes de conception actuelles, la taille du réservoir est souvent grossièrement estimée.

Dans le cas d'un réservoir trop petit, il en résulte une insatisfaction des usagers lorsque des débordements de réservoir se produisent. Ce gaspillage

d'eau fait subir à la population des privations en ce qui concerne la consommation personnelle et affecte la rentabilité de l'opération quand les excédents d'eau sont habituellement vendus ou destinés à l'irrigation. Lorsque le réservoir est sur-dimensionné, les villageois ont alors à faire face à des coûts de construction trop élevés.

La démarche entreprise dans cet article a pour but d'offrir une méthode de conception du réservoir qui ne se base pas uniquement sur le jugement et/ou les expériences passées.

L'analyse du comportement des différentes composantes d'un système de pompage solaire a permis de mettre au point des modèles informatiques qui ont ensuite été validés grâce à des données obtenues sur le terrain au Sénégal. Le logiciel développé dans ce travail a pour but d'offrir une grande flexibilité pour la simulation de différents types d'équipement dans divers milieux d'opération. La qualité des résultats dépend étroitement de la précision des paramètres décrivant l'équipement et des données météorologiques.

Grâce au logiciel, on pourra prédire le fonctionnement de nouvelles installations et assurer le suivi des systèmes déjà en place. La personne qui doit concevoir le système PV, de concert avec la communauté villageoise, sera capable de déterminer la taille optimale du réservoir (et peut-être valider les résultats obtenus avec les règles empiriques) permettant ainsi de mieux évaluer les coûts et les risques de pénurie qui sont liés à l'exploitation d'un système de pompage PV.

Mots clés : *approvisionnement en eau pour les pays en voie de développement, pompage solaire, réservoir.*

1 - INTRODUCTION

Les systèmes de pompage photovoltaïques (PV) ont connu au cours de la dernière décennie un développement rapide, principalement en ce qui touche les générateurs et les groupes moto-pompe (GMP). Cependant, une moindre attention a été portée à l'aspect génie civil (réservoir d'eau et système de distribution). Sachant que cet aspect représente très souvent plus de 25 % du capital initial à investir et qu'on trouve encore des réservoirs sur-dimensionnés ou, à l'inverse, qui débordent, chercher à optimiser la taille de ces derniers est un exercice qui s'avère nécessaire.

Le but de ce travail est d'élaborer, peut-être pour la première fois, une méthode d'analyse pour déterminer la taille du réservoir d'eau dans un système de pompage photovoltaïque. Cet aspect crucial de la conception des systèmes de pompage PV est souvent basé sur le jugement de la personne en charge de la conception, ce qui fait que des ordres de grandeurs pour le volume du réservoir sont suggérés, pouvant varier de la moitié au double du débit quotidien du système.

Le logiciel développé permet de prédire le fonctionnement lors de l'exercice de conception de nouveaux systèmes, de même que d'effectuer le diagnostic d'installations déjà existantes. La simulation informatique permet

l'application universelle de modèles (scientifiques et économiques) et donc, de traiter de nombreux cas en faisant varier certains paramètres. Le comportement aléatoire de l'ensoleillement est aussi étudié de façon adéquate. Grâce à l'utilisation du logiciel, on pourra améliorer les installations et les rendre plus économiques de même que, le cas échéant, corriger simplement le mode de gestion de l'eau que pratiquent les villageois, par le biais d'actions d'information et d'éducation.

Il est à noter dès le départ que notre propos n'est pas d'offrir une méthode radicalement nouvelle de conception pour les générateurs et les groupes moto-pompe. Les méthodes de conception/sélection pour ces deux composantes existent déjà et, dans la plupart des cas, ont donné entière satisfaction. Par contre, une fois ces deux composantes définies, le logiciel permet de pousser l'exercice de conception plus loin en optimisant la taille du réservoir nécessaire à l'installation.

Une fois la communauté villageoise décidée quant aux investissements monétaires qu'elle est prête à faire pour le réservoir, le logiciel suggère ensuite des corrections à apporter à la taille du générateur et du groupe moto-pompe du système. Les investissements requis sont les principaux résultats du logiciel et ils permettent d'offrir à la personne concevant le système, de concert avec la communauté villageoise, une méthodologie sur laquelle baser ses décisions.

1.1 DESCRIPTION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PV

Les pompes photovoltaïques sont utilisées principalement dans deux types d'application : l'approvisionnement en eau villageois (250 à 2000 habitants) et l'irrigation de petits périmètres (un à deux hectares). La majorité des systèmes installés jusqu'à maintenant tombent dans la première catégorie, bien qu'une nette tendance est perceptible vers l'implantation de systèmes appartenant à la seconde catégorie. De nombreuses installations produisent de l'eau qui est utilisée pour ces deux fins.

Une installation typique est schématisée à la figure 1 (AFME, 1991). Une conception similaire peut être choisie pour un système d'irrigation, qui pourrait comprendre plusieurs bassins de reprise. Ces derniers sont des réservoirs de petits volumes (2 à 4 m³) situés près des champs et qui permettent l'utilisation de l'eau (par gravité ou manuellement) au moment voulu.

2 - MÉTHODOLOGIE

Alors que le débit d'un groupe moto-pompe peut être déterminé avec précision au moyen d'équations généralement fournies par les manufacturiers, le paramètre des habitudes de consommation par contre, est très peu étudié dans le cas du pompage solaire. L'expérience montre que dans

certains villages, les femmes vont tôt le matin au puits, n'y vont pas à l'heure du midi (à cause de la chaleur) et reprennent leurs activités en soirée. Le réservoir doit alors subvenir aux besoins matinaux grâce aux surplus stockés la veille. Les besoins de l'après-midi sont, eux, comblés par la quantité importante d'eau pompée au cours de la période du midi. Un autre type d'utilisation est celui où les femmes ne vont au puits qu'en fin d'après-midi, une fois le réservoir rempli. La figure 2 illustre ces deux types de comportement, observés lors de visites sur le terrain dans deux villages du Sénégal, Mérina-Dakhar (1 100 habitants) et N'diné (800 habitants).

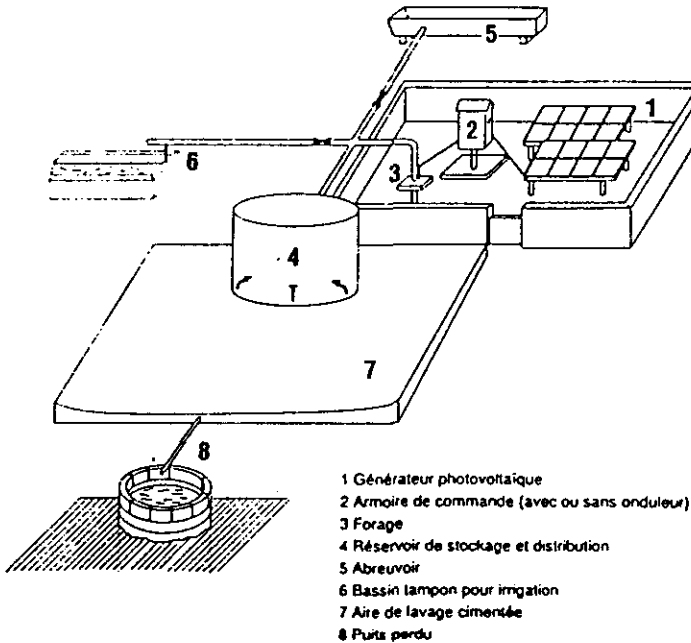


Figure 1 Système de pompage solaire (AFME & DNHE Mali).
Solar water pumping system (AFME & DNHE Mali).

Le but de l'analyse est de présenter une courbe corrélant le volume d'eau à stocker dans un – ou plusieurs – réservoirs, donc d'évaluer l'investissement initial ainsi que le risque de pénurie. Ces courbes 'coût-risque' doivent être définies en terme d'ensoleillement disponible pour chaque mois, et plus particulièrement pour le (les) plus mauvais mois de l'année.

Le domaine d'application de cette analyse se limite à la définition de la taille du réservoir. Il faut cependant savoir que la taille du réservoir choisi influence à son tour l'importance que devront prendre les autres composantes du système. Le matériel de construction utilisé et la forme que prendra le réservoir peuvent ensuite être choisis selon les ressources locales.

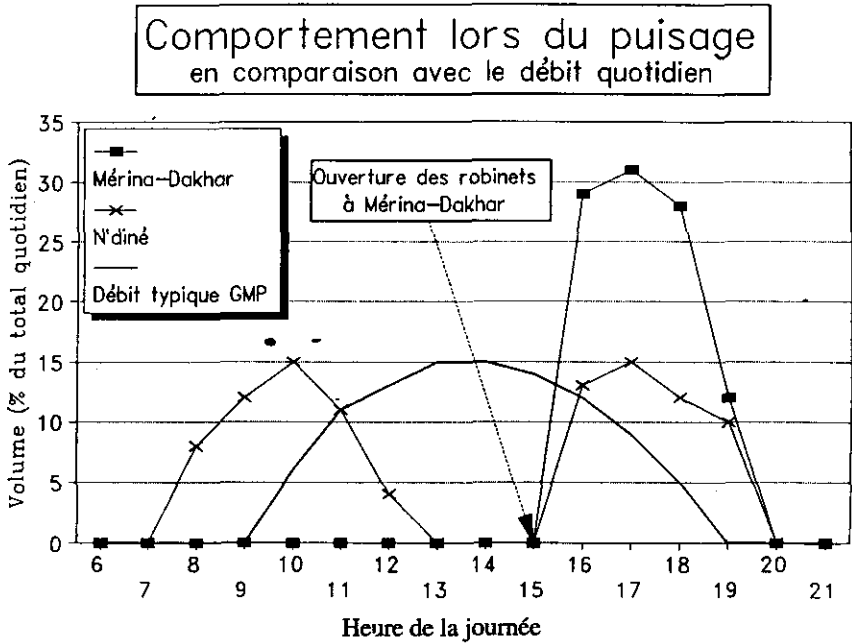


Figure 2 Types de consommation quotidienne.
Daily consumption patterns.

2.1 Analyse utilisée

Tout d'abord, il est de bon aloi de mener une campagne de mesure sur les sites où seront installés les systèmes de pompage PV ou, à tout le moins, d'utiliser des données fiables sur les conditions physiques (telles l'ensoleillement, la température, la profondeur du puits/forage et le rabattement et la capacité de la nappe phréatique) et le milieu humain (afin d'évaluer les habitudes des gens et les quantités d'eau utilisées). L'utilisation de données relevées à chaque heure permet de mieux apprécier la variation des conditions climatiques d'ensoleillement et de température ambiante.

Nous pouvons ensuite procéder, dans un premier temps, avec le calcul de la moyenne de la température et de l'ensoleillement global et aussi effectuer le calcul de l'écart-type de l'ensoleillement global et ce, pour chaque heure de la journée.

Nous obtenons alors ce que nous appellerons une « journée-type » pour le mois (ou la période) étudié, contenant les paramètres d'environnement horaires moyens comme nous le montre la figure 3, où l'on retrouve l'ensoleillement moyen et la température moyenne pour le mois de décembre à Dakar, Sénégal.

Le logiciel développé dans ce travail permet la lecture de plusieurs types de courbes simultanément. L'ordonnée, graduée de 0 à 1, représente un pourcentage de la valeur maximale, pour une courbe donnée, qu'on retrouve

dans la légende. L'abscisse représente le temps, divisé en tranche d'une heure. En utilisant la figure 3 comme exemple, l'ensoleillement à midi est à peu près à 0.8 de 1 kiloWatt/m², soit 800 Watts/m².

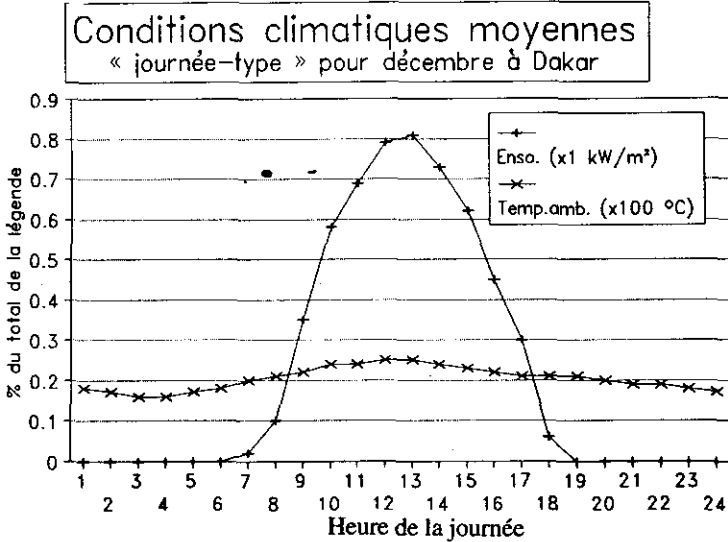


Figure 3 Ensoleillement et température ambiante de la journée-type.
Solar radiation and ambient temperature for a typical day.

L'écart-type de l'ensoleillement pour chaque heure de la journée-type nous permet de calculer la disponibilité moyenne de l'ensoleillement, D, pour le système PV. Des résultats typiques de disponibilité pour deux heures de la journée-type de décembre 1990 (10 et 13 heure) sont donnés au tableau 1. Ce tableau permet de savoir qu'à 13 heure par exemple, il y a 100 % de chance d'avoir un ensoleillement d'au moins 500 W/m². Par contre, si nous prenons un ensoleillement plus élevé pour la conception, disons 950 W/m², il y a 20 % de risque de ne pas atteindre ce niveau d'ensoleillement. On voit donc clairement que pour une conception conservatrice, impliquant de plus grands investissements initiaux, on choisira un haut pourcentage de disponibilité.

Les caractéristiques courant-tension (I – V) peuvent ensuite être déterminées en utilisant ces paramètres climatiques dans un modèle pour trouver la puissance d'opération, P_{réelle}, du générateur photovoltaïque. Nous pouvons ensuite estimer assez facilement le débit du GMP, Q, pour chaque heure de la journée-type du mois étudié, et ce pour autant de scénarios de disponibilité d'ensoleillement qu'on souhaite étudier.

En superposant à ces différentes courbes de débit du GMP la courbe du comportement de collecte de l'eau (fig. 2), on peut déterminer la quantité d'eau disponible à la consommation à toute heure de cette journée-type, en faisant un simple bilan hydrique. Le volume du réservoir requis est calculé pour chaque scénario d'ensoleillement, en employant une méthode volumétrique.

Tableau 1 Disponibilité de l'ensoleillement.

Table 1 Sunshine availability.

Décembre 90 - 10 heures		Décembre 90 - 13 heures	
Ensoleillement (W/m ²)	Disponibilité (%)	Ensoleillement (W/m ²)	Disponibilité (%)
150	100	500	100
200	99,8	600	99,4
250	99,2	700	97,2
300	96,7	743,1	95
314,3	95	750	94,7
350	90,8	800	91,7
355,2	90	822,4	90
400	82,9	850	88
417,4	80	900	84
447,5	75	950,2	80
450	74,6	1 000	76,2
		1 016,2	75
		1 050	72,6

Ces différentes tâches, exécutées par le logiciel CITERNE développé au cours de cette recherche, sont illustrées à la figure 4. Muni d'un fichier de données horaires (avec l'ensoleillement et la température ambiante) pour une période jugée significative et une bonne paramétrisation des composantes du système de pompage PV, CITERNE offre la souplesse nécessaire pour étudier n'importe quel système de pompage PV, quelque soit le site d'application.

Pour l'exercice de conception d'un nouveau système, le volume du réservoir requis peut alors être évalué selon les différents scénarios de disponibilité de l'ensoleillement. La courbe des coûts reliés à la construction du réservoir versus le risque de pénurie est tracée pour la période étudiée. Le concepteur peut maintenant décider de la taille du réservoir, ayant à l'esprit les capitaux que la communauté rurale peut investir ainsi que les risques de pénurie qu'est prête à prendre la population.

Dans le cas de l'analyse d'un système existant, on prendra le volume calculé grâce au débit moyen du système en place (qui devrait correspondre à la demande moyenne, si la conception a été correctement effectuée à l'origine). On pourra ensuite procéder à la construction d'un réservoir auxiliaire ou à un changement dans la gestion du système.

2.1 Modèles théoriques

Une bonne connaissance des courbes caractéristiques de courant (I , ampères) et de tension (V , volts) d'un générateur PV est d'une importance primordiale dans cette analyse. Le modèle choisi doit simuler la courbe I - V dans le domaine de température, d'ensoleillement et de dégradation de la cellule dans lequel le système opère, comme le montre la figure 5 (ÉNERGIE, MINES et RESSOURCES CANADA, 1989). Le modèle développé par le JET PROPULSION LABORATORY (JPL, 1976), bien qu'offrant une précision moindre pour le courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit-ouvert V_{co} , est très

précis lorsqu'il s'agit de déterminer le point de puissance maximale, P_{max} , ce qui nous convient parfaitement.

Préparation des données :	Fichiers :
Campagne de mesures sur le terrain : I, V, Ensoleillement, Pression, Q	*.MES
Paramètres des équipements générateur et groupe moto-pompe	*.GEN et *.GMP
Données sur le comportement au puisage : volume puisé par heure	*.VIL

Tâches à exécuter selon le type d'étude :

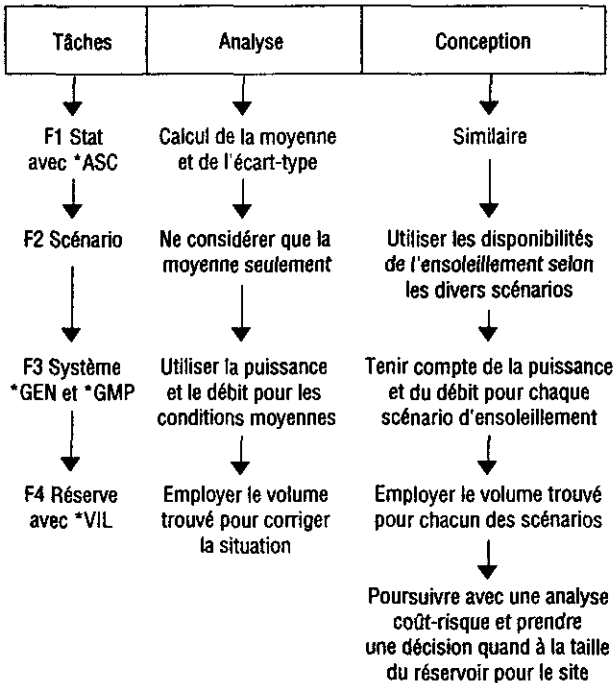


Figure 4 Organigramme décisionnel du logiciel CITERNE.
CITERNE Software flow chart.

Le courant dans une cellule, I_c , est donné par l'expression (1), où I_l est le photocourant, I_o , le courant de saturation de la diode, K , la constante de Boltzmann ($1,3812 \times 10^{-23}$ J/K), q , la charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb), A , la constante de la diode (entre 1 et 5), R_s , la résistance de série (en ohm, Ω), R_{sh} , la résistance du shunt (Ω) et V_c , la tension dans une cellule.

$$I_c = I_l - I_o \left(\exp \left(\frac{q(V_c + I_c R_s)}{AKT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_c}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Comme $R_{sh} \gg V_c$, nous avons :

$$\left(\frac{V_c}{R_{sh}} \right) \rightarrow 0 \tag{2}$$

L'expression du courant de la cellule se lit donc comme suit :

$$I_c = I_l - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_c + I_c R_s)}{AKT} \right) - 1 \right) \tag{3}$$

L'équation (3) n'est applicable qu'à un seul niveau d'ensoleillement, S (W/m^2), et de température ambiante, T_a ($^{\circ}C$). Le modèle JPL permet d'obtenir le courant et la tension de la cellule dans des conditions d'opération autres que celles de référence ($S_r = 1000 W/m^2$ et $T_r = 25 ^{\circ}C$) grâce à des équations de transformation.

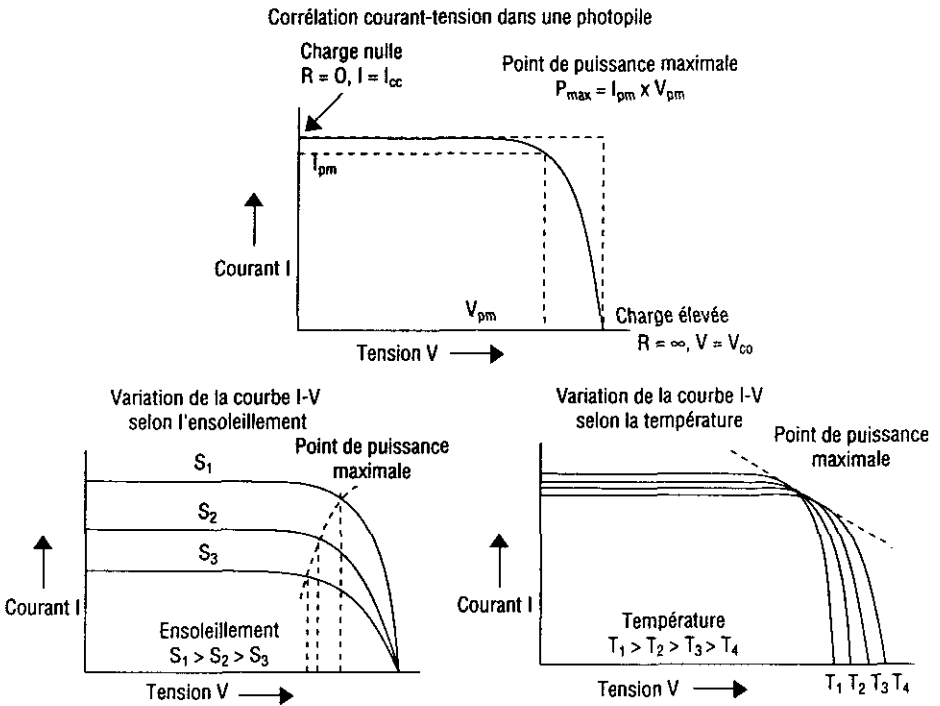


Figure 5 Courbes courant-tension (EMR Canada).
Current-voltage curves (EMR Canada).

Le générateur PV contient N_p chaînes en parallèle et N_s cellules sont connectées en série dans une chaîne. La tension V et le courant I du générateur sont :

$$V = N_s V_c \tag{4}$$

$$I = N_p I_c \tag{5}$$

La puissance générée par l'aire, P , pour des conditions d'ensoleillement S et de température ambiante T_a est :

$$P = VI \quad (6)$$

En considérant les pertes de rendement (exprimées en %) qui affectent la performance d'un générateur par rapport au vieillissement E_v , à la poussière et l'ombrage E_p et aux connexions (entre les cellules et par le câblage) E_c , la puissance réelle $P_{réelle}$ est exprimée de la façon suivante :

$$P_{réelle} = E_v E_p E_c P \quad (7)$$

On rencontre fréquemment dans la littérature concernant le pompage PV une équation polynomiale mettant en cause la puissance électrique produite par le générateur (Watt) et le débit horaire, Q (m^3/h). Cette équation est de la forme :

$$P_{réelle} = f(Q) \quad (8)$$

L'équation (8) est utilisée par HAMIDAT (1989) – et d'autres auteurs – dans un modèle linéaire d'ordre trois comme le montre l'équation (9).

$$P_{réelle} = a Q^3 + b Q^2 + cQ + d \quad (9)$$

Les coefficients a , b , c et d varient selon le type de GMP utilisé, sa vitesse de rotation (rpm) et la hauteur manométrique totale, HMT(m). La HMT représente la hauteur de relevage, les pertes de charge mineures et les pertes causées par la friction dans le système de distribution.

Pour définir ces coefficients, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés où l'on minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs prédites par le modèle et celles qui ont été observées. L'écriture symbolique du modèle est la suivante :

$$\phi = \sum (P_{réelle}^m - P_{réelle}^c)^2 \quad (10)$$

où ϕ est la somme des écarts au carré, $P_{réelle}^m$ les puissances mesurées et $P_{réelle}^c$ les puissances calculées à l'aide du modèle (équation 9).

La seule opération nécessaire pour identifier les paramètres du modèle consiste à effectuer les dérivées premières de ϕ par rapport aux paramètres et à poser ces dérivées égales à zéro, comme le montre les équations (11) :

$$\frac{\partial \phi}{\partial a} = 0 ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial b} = 0 ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial c} = 0 ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial d} = 0 \quad (11)$$

Ce qui nous donne dans ce cas un système de quatre équations avec quatre inconnues. La solution de ce système donne la valeur des paramètres (NEYRAC & NOLAY, 1986 et BAILLARGEON, 1985).

La méthode volumétrique, qu'utilise entre autres AL-LAYLA *et al.* (1977), calcule le bilan hydrique (le débit moins la consommation) dans le réservoir pour chaque heure. Cette méthode présente la variation horaire du stockage, permettant de trouver le volume du réservoir requis pour satisfaire les grandes variations.

La hauteur du réservoir par rapport au sol doit être déterminée selon les règles de l'art, à son minimum acceptable pour une exploitation correcte de l'eau pompée. Une erreur sur la hauteur du château d'eau peut mener à un surdimensionnement du système de pompage largement plus pénalisant qu'une imprécision sur le volume du réservoir. Notons au passage que le rabattement de la nappe phréatique peut varier au cours d'une année ainsi qu'au cours d'une journée ; cet important facteur doit donc être dûment considéré.

WAGNER (1988) propose l'utilisation de la distribution normale pour simuler le rayonnement solaire dans son approche pour concevoir les systèmes PV avec batteries. Cette distribution offre une grande facilité d'utilisation (on a simplement besoin de connaître la moyenne \bar{S} et l'écart-type σ) et compense lorsqu'il y a des manquements dans la continuité des données. La distribution normale s'est avérée adéquate pour simuler les conditions qu'on retrouve au Sénégal.

Une fois \bar{S} et σ de l'ensoleillement horaire S connus, on pourra évaluer la disponibilité D de l'ensoleillement au cours d'une journée-type pour une certaine période. La distribution normale $f(x)$ qui décrit la densité de probabilité de l'ensoleillement pour l'heure est donnée comme suit :

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2} \right) \quad (12)$$

$$x = \frac{S - \bar{S}}{\sigma} \quad (13)$$

où

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (14)$$

et

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 - n\bar{S}^2 \right) \quad (15)$$

n est le nombre de jours considérés.

La contribution à la disponibilité moyenne \bar{D} est donnée par :

$$d D(S_d) = D(S_d) f(x) dx \quad (16)$$

où S_d est un certain ensoleillement nominal, appelé la demande en ensoleillement, $D(S_d)$ est un facteur de disponibilité et $f(x) dx$ est la probabilité qu'un ensoleillement journalier de l'intervalle $[S, S + dS]$ se produise.

2.2 Collecte de données

Une collecte de données a été effectuée au Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables - CÉRÉR - de Dakar (Sénégal) à l'aide d'un banc d'essais de pompage. Ces installations nous ont permis d'observer un système de pompage PV dans différentes conditions d'opéra-

tion et de contrôler certains paramètres, dont la hauteur manométrique totale (HMT) avec un régulateur de pression.

Les points de mesure relevés par le système d'acquisition sont les suivants : l'ensoleillement dans le plan des modules (W/m^2), la température ambiante ($^{\circ}C$), la tension et le courant du générateur à l'entrée de l'onduleur, la hauteur manométrique totale (m), le débit de la pompe (m^3/h) et la température de la face arrière des modules PV ($^{\circ}C$).

Ces données horaires sont illustrées aux figures 6 et 7 et ont permis d'identifier les journées-types, de valider le modèle JPL et de calculer les coefficients a, b, c et d.

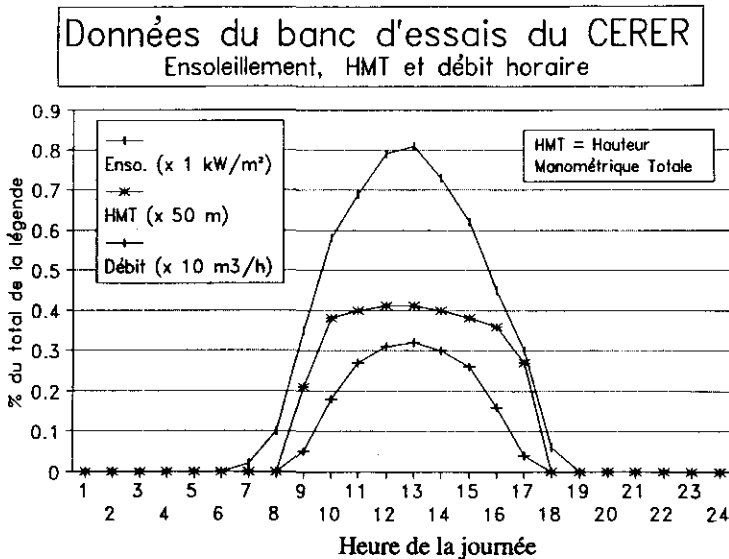


Figure 6 Données expérimentales I.
Field data I.

Le comportement des utilisatrices a été étudié dans deux villages du Sénégal. On a déterminé la consommation horaire (m^3/h) de l'eau au cours d'une journée. Les graphiques de consommation ainsi obtenus ont été présentés à la figure 2 où l'ordonnée représente le volume d'eau puisé à chaque heure, en pourcentage de la consommation quotidienne totale.

Une évaluation des coûts reliés à la construction du réservoir par FARCOT (1988) estime le coût au mètre cube pour un réservoir cylindrique en béton à 470 FF/ m^3 ou 94 \$Can/ m^3 (1 Dollar Canadien valant 5 Francs Français). Les coûts reliés à d'autres matériaux qui peuvent être utilisés pour fabriquer les réservoirs sont 1 200 FF/ m^3 (240 \$Can/ m^3) pour un réservoir métallique et 1 675 FF/ m^3 (335 \$Can/ m^3) pour un réservoir en béton armé. Notre analyse requiert aussi une connaissance du coût au Watt crête d'un système PV (générateur, GMP, onduleur et accessoires) sans l'aspect génie civil. L'AFME (1991) évalue ces coûts entre 50 et 125 FF/ W_c (10 à 25 \$Can/ W_c).

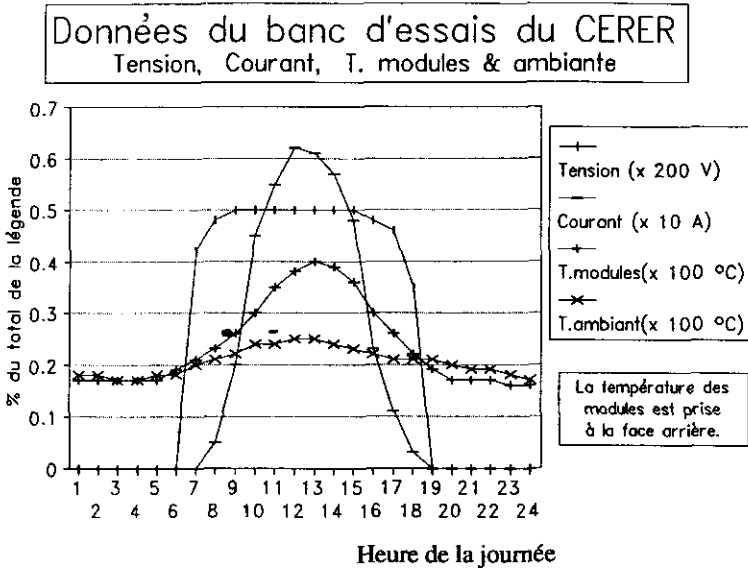


Figure 7 Données expérimentales II.
Field data II.

3 - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le logiciel CITERNE permet, dans un premier temps, de déterminer une journée-type, calculée à partir de la moyenne et de l'écart-type de l'ensoleillement pour les périodes critiques d'ensoleillement ou de consommation d'eau ou une combinaison de ces deux facteurs. Le calcul de cinq scénarios de disponibilité d'ensoleillement est ensuite exécuté pour chacune de ces périodes. A titre de comparaison, le logiciel affiche une sixième courbe, l'ensoleillement moyen, permettant ainsi au concepteur d'évaluer les risques liés à l'emploi de la moyenne lors de la conception. Par exemple, pour les scénarios de décembre 1990 présentés à la figure 8, on constate que la courbe moyenne se situe entre les courbes qui représentent 5 et 10 % de risque de ne pas avoir ces niveaux d'ensoleillement.

L'emploi de données horaires et de journée-type a permis une analyse du comportement des systèmes PV plus fine que celles habituellement utilisées dans la conception, où on utilise plutôt des données quotidiennes ou même mensuelles. Ce genre de données n'est pas toujours à la disposition de la personne chargée de la conception, mais des efforts afin d'obtenir ces données devraient faire partie des activités de préconception des systèmes de pompage solaires. Pour obtenir de bons résultats, surtout dans le cas de sites où le climat est très variable (comme en Asie du sud-est), des données horaires sur plusieurs jours sont nécessaires. Des stations météorologiques dans plusieurs régions, dont le Sahel, mettent ces données à la disposition du concepteur.

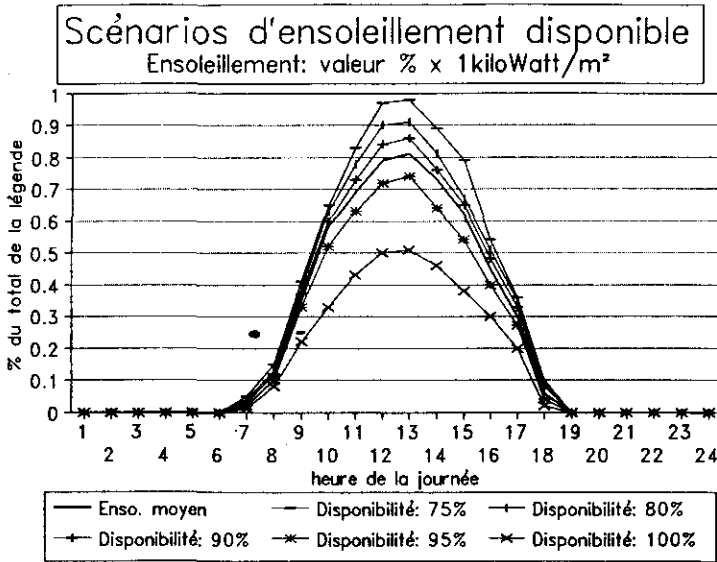


Figure 8 Scénarios d'ensoleillement disponible (valeur % x 1 kW/m²).
Available sunshine scenarios.

La puissance du générateur selon les différents scénarios d'ensoleillement est calculée avec le modèle JPL. Un processus de validation pour comparer les puissances théoriques obtenues et les puissances empiriques est ensuite possible en utilisant une expression similaire à l'équation (6) si les données requises sont disponibles. A la lumière de ces résultats, présentés au tableau 2, il semble qu'en début et fin de journée, le modèle théorique ne simule pas très bien la puissance produite par le générateur. Après l'étude des données des autres mois, nous concluons que pour des niveaux d'ensoleillement inférieurs à 250 W/m², le concepteur ne doit pas se fier aux résultats du modèle JPL. Pour des niveaux plus élevés, et c'est ce qui nous intéresse, le modèle offre de bons résultats.

Tableau 2 Procédure de validation.

Table 2 Validation process.

Procédure de validation pour décembre 1990			
Heure	Puissance théorique (W)	Puissance empirique (W)	Différence (%)
10	222,4	235,2	5,8
11	402,8	418,2	3,8
12	503,8	525,7	4,4
13	570,3	593,7	4,1
14	570,3	593,2	4,0
15	546,1	566,6	3,8
16	478,4	492,2	2,9
17	353,7	360,5	1,9
18	148,4	173,8	17,1

Le calcul des débits pour une HMT donnée est maintenant possible grâce aux coefficients du GMP trouvés avec un logiciel d'analyse statistique. CITERNE calcule le volume du réservoir requis selon les différents scénarios avec les paramètres relatifs au site : la HMT (considérée comme constante), la population (et le bétail), la consommation per capita et le genre de comportement lors du puisage.

Le logiciel s'applique à des systèmes « au fil du soleil ». Dans certaines zones, comme la Polynésie française, le recours au stockage électrochimique est moins cher que le stockage de l'eau compte tenu du coût local du génie civil. Le logiciel pourrait, en modifiant quelques routines, tenir compte de cette solution qui commence à faire son apparition vu la très grande souplesse qu'elle offre. En effet, l'utilisation du stockage électrochimique optimise la performance du GMP en le 'décorellant' de l'ensoleillement et offre la possibilité d'utiliser l'électricité PV non utilisée par le pompage dans certaines conditions (par exemple durant la saison des pluies) pour d'autres applications, comme la recharge de lampes portatives.

4 - EXEMPLE D'UTILISATION DU LOGICIEL

Prenons l'exemple d'un village avec une HMT de 25 mètres pour illustrer les résultats obtenus avec le logiciel CITERNE. La population du village est de 800 personnes consommant chacune en moyenne 20 litres/jour. Ajoutons à cela un troupeau de bétail de 50 têtes qui consomment chacune 35 litres/jour. La demande quotidienne est donc estimée à $18 \text{ m}^3/\text{jour}$. Les utilisatrices collectent l'eau le matin et en fin d'après-midi. Notons que l'introduction d'un système PV dans un village peut affecter ces paramètres en ce sens qu'une augmentation de la population et de la consommation est à prévoir et qu'un changement dans les habitudes de puisage est aussi possible. Les coûts reliés au réservoir sont de $500 \text{ FF}/\text{m}^3$ et les coûts du générateur (et autres équipements) sont estimés à $100 \text{ FF}/W_c$. Les coûts du forage et d'installation sont les mêmes quelque soit le scénario choisi. Les résultats obtenus avec CITERNE sont montrés au tableau 3.

Si ce système existe déjà, le débit quotidien moyen du GMP se doit d'être égal ou légèrement supérieur à la demande hydrique journalière, et on considère que le volume du réservoir nécessaire à l'installation est celui obtenu à partir des conditions moyennes d'environnement, donc 9.8 m^3 . Si nous faisons la conception d'un nouveau système, on effectue l'étude avec les résultats obtenus pour les différents scénarios de disponibilité d'ensoleillement du tableau 3.

Il peut sembler surprenant à prime abord que la grosseur des équipements requis (générateur et réservoir) augmente avec les risques de pénurie. On voit clairement que le générateur suggéré pour le scénario de 75 % débite beaucoup plus que nécessaire ($24.1 \text{ m}^3/\text{jour}$) tandis que celui du scénario de

100 % est insuffisant pour satisfaire la demande (8.8 pour une demande de 18 m³/jour). D'autre part, les coûts liés au générateur sont plus importants que ceux liés au réservoir. Il faut ajuster la taille de ces composantes avec un facteur multiplicatif représentant le ratio entre la demande hydrique du village (18 m³/jour) et le débit quotidien trouvé pour chaque scénario. Ce facteur multiplicatif permet d'ajuster la puissance crête $P_{\text{crête}}$ (ces valeurs ont été arrondies pour refléter des puissances qu'on peut retrouver sur le marché, soient des multiples de 40 Watts/panneaux) et le volume du réservoir (en m³).

Tableau 3 Processus décisionnel.

Table 3 Decisionnal process.

Processus de sélection de la taille du générateur et du réservoir						
Demande = 18m ³ /j	Scénarios (%)					Moyenne
	100	95	90	80	75	
$P_{\text{crête}}$ (W)	400	560	640	720	760	600
Débit (m ³ /j)	8,8	17,0	19,3	22,6	24,1	18,2
Volume (m ³)	9,0	9,5	10,8	13,0	14,2	9,8
Facteur multiplicatif	2,10	1,10	0,90	0,79	0,75	1
$P_{\text{crête}}$ requise (W)	840	620	580	570	560	600
Coût générateur (FF)	84 000	62 000	58 000	57 000	56 000	60 000
Volume ajusté (m ³)	19,0	10,5	9,7	10,3	10,7	9,8
Coût réservoir (FF)	9 500	5 250	4 850	5 150	5 350	4 900
% du total	5,2	3,3	3,2	3,4	3,5	3,2
Coût forage, etc. (FF)	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000
Coût total (FF)	183 500	157 250	152 850	152 150	151 350	154 900
Risque (%)	0	5	10	20	25	5-10

En considérant ces deux facteurs, on obtient une courbe comme celle présentée à la figure 9, où la courbe des coûts cumulés (sans le forage) suit la tendance à laquelle on s'attend : plus les risques de pénurie sont grands, plus les coûts diminuent. On remarque que les coûts diminuent de moitié lorsqu'on passe d'un scénario sans risque à un scénario – encore acceptable – qui comporte 5 % de risque. Il ne reste qu'à évaluer correctement les contraintes financières locales en impliquant dans le processus décisionnel les représentant-e-s du village qui ont à cœur le bon fonctionnement du système.

La souplesse d'adaptation des usagers à une taille donnée d'un système PV a bien sûr ses limites, mais ce facteur joue néanmoins un rôle déterminant dans le processus décisionnel.

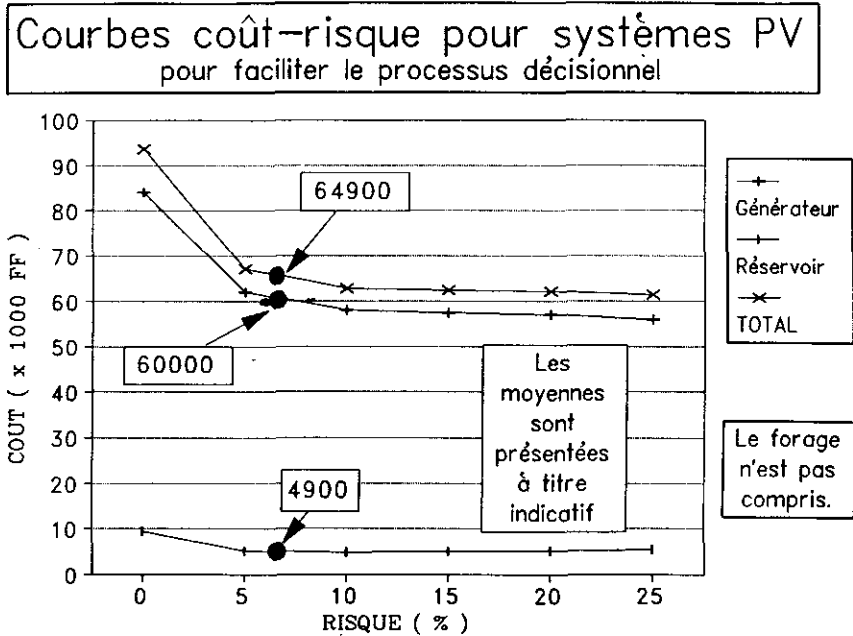


Figure 9 Courbes coût/risque.
Cost/risk curves.

5 - CONCLUSION

Nous avons démontré dans cet article qu'optimiser la taille du réservoir entraîne des changements dans la taille des autres composantes du système (GMP, générateur PV), ce qui permet d'ajuster le dimensionnement du système entier, selon les conditions climatiques et les besoins du village. Des économies substantielles pourront donc être réalisées lors des investissements initiaux.

L'approche de la « journée-type » s'est avérée la plus appropriée pour les situations où les données – de bonne qualité – sont soit inexistantes, soit non-consécutives. Si des données complètes et qui s'échelonnent sur plusieurs années sont disponibles, il serait alors préférable d'utiliser lors de la conception le nombre réel de jours consécutifs où un certain seuil d'ensoleillement n'est pas atteint au cours des mois dits critiques.

Le logiciel CITERNE pourra aussi être utilisé comme instrument de validation des différentes règles empiriques utilisées pour déterminer le

volume du réservoir. Conçu de façon modulaire, le logiciel pourrait facilement incorporer des routines simulant d'autres composantes de systèmes hybrides de pompage (PV avec diesel, éolienne ou batteries par exemple).

REMERCIEMENTS

En plus des remarques constructives des trois réviseurs qui ont contribué à améliorer et clarifier le contenu de cet article, les auteurs tiennent à remercier Krystyna Dunska (Agence canadienne de développement international), Éline Lachance (Université du Québec à Montréal) et Jean-Pierre Villeneuve (INRS-Eau) pour leur lecture attentive et leurs commentaires pertinents.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE FRANÇAISE POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE, DIRECTION NATIONALE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ÉNERGIE DU MALI & MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION ET DU DÉVELOPPEMENT DE FRANCE (1991) *Le pompage solaire photovoltaïque : 13 années d'expérience et de savoir-faire au Mali*, Bamako, Mali.
- AL-LAYLA M. A., AHMAD S. & MIDDLEBROOKS E. J. (1977) *Water Supply Engineering Handbook*, Ann Arbor Science.
- BAILLARGEON G. (1985) *Méthodes statistiques volume 2*, Édition SMG, Trois-Rivières, Québec, Canada
- ÉNERGIE, MINES ET RESSOURCES CANADA (1989) *Conception des systèmes photovoltaïques*, Ottawa, Ontario, Canada.
- FARCOT A. (1988) *Fiche technique : Réservoir en béton de 18 m³*, Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables, Dakar, Sénégal.
- HAMIDAT A. (1989) *Étude et simulation des performances réelles sur une longue période des systèmes de pompage photovoltaïques au fil du soleil*, Centre de développement des énergies renouvelables, Alger, Algérie.
- JET PROPULSION LABORATORY (1976) *Solar Cell Design Handbook vol. 11*, Pasadena, Californie, États-Unis.
- NEYRAC F. P. & NOLAY P. (1986) *Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'identification sans jamais oser le demander*, École nationale supérieure des mines de Paris, France.
- WAGNER A. (1988) *Le dimensionnement de systèmes PV standard à l'aide du bilan énergétique*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Allemagne.